

**Г. В. Шимов<sup>\*</sup>, А. А. Завалин, А. А. Богатов**

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>geosh@bk.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКЕ ТРУБ ПРИ БЕЗОПРАВОЧНОМ ВОЛОЧЕНИИ

В работе представлены результаты исследования остаточных напряжений в нержавеющей холодноотянутых трубах, полученные при МКЭ-моделировании процесса безоправочного волочения. Установлена связь величины обжатия, угла конусности рабочей зоны волоки, скорости волочения и коэффициента трения с характером распределения и величиной остаточных напряжений в стенке труб.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, МКЭ-моделирование, безоправочное волочение труб, упругая разгрузка, тепловая разгрузка.

**G. V. Shimov, A. A. Zavalin, A. A. Bogatov**

## STUDY OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE SINK DRAWING ON DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE PIPES

The paper presents the results of the FEM simulation of residual stresses in stainless cold-drawn pipes obtained during of the sink drawing. The relationship between the reduction in thickness, approach angle, drawing speed and coefficient of friction with the distribution of the residual stresses in the pipe wall.

*Keywords:* residual stresses, FEM simulation, sink drawing of pipes, release of elastic stresses, release of thermal stresses.

### ВВЕДЕНИЕ

Общим свойством остаточных напряжений является то, что они всегда бывают чисто упругими, даже если возникают в результате пластической деформации. Эти напряжения могут быть сняты или ослаблены способами, которые приводят к уменьшению упругих деформаций, соответствующих остаточным напряжениям, с последующим рассеиванием упругой потенциальной энергии, накопленной в материале [1]. Исследованиям остаточных напряжений в трубах, а особенно в трубах ответственного назначения, уделено достаточно много внимания в научной литературе, как в отечественной, так и в современной зарубежной [2–5].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный анализ распределения остаточных напряжений является долгой, трудоемкой и дорогостоящей процедурой, а результаты далеко не всегда однозначны. На практике производства металлоизделий более эффективным и сравнительно дешевым методом анализа является теоретический анализ, проводимый с целью прогнозирования наиболее вероятной схемы распределения остаточных напряжений в объеме изделия.

Современные пакеты прикладных программ МКЭ-моделирования при упругопластической постановке задач дают возможность наблюдать возникновение остаточных напряжений при деформационной и тепловой обработке, а также изменение напряженного состояния в объеме металлоизделий при силовой и тепловой нагрузке. В программном комплексе DEFORM при упругой постановке задачи оценка упругой разгрузки может быть произведена в каждом элементе сетки (рис. 1), что дает возможность оценить распределение остаточных напряжений по всему объему тела.



Рис. 1. Кривая нагружения упругопластического материала

В расчете остаточного напряженного состояния учитывается упругая разгрузка металла в соответствии с заданной величиной упругих констант материала. Кроме того, можно оценить температурные напряжения исходя из коэффициента температурного расширения материала. Все константы могут быть заданы таблично в зависимости, например, от температуры.

С целью анализа влияния параметров технологического процесса на распределение остаточных напряжений в стенке труб при безоправочном волочении было проведено МКЭ-моделирование в пакете DEFORM.

Заготовкой являлась труба предготовительного размера из стали 12X18H10T, которая протягивалась без оправки через волоку, после чего проводилась снятие нагрузки (удаление инструмента в DEFORM) и ее естественное охлаждение. После полной разгрузки (10–15 минут) происходила не большая упругая деформация трубы (разгрузка), перераспределение температуры и остаточных напряжений по сечению стенки трубы. После остановки расчета исследовалось распределение остаточных напряжений ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  и  $\sigma_{zz}$ ) в стенке трубы в зависимости от технологических параметров процесса: угла конусности рабочей зоны волоки  $\alpha$ , коэффициента трения  $\mu$ , конечной толщины стенки трубы  $S$  и

скорости волочения  $V$ . При этом за стационарную фазу волочения принималась деформация участка, отстоящего от исходного сечения выхода из волоки на расстоянии не менее 5 диаметров трубы (прутка). Материал трубы – упругопластический, материал инструмента – абсолютно жесткий. Сетка конечных элементов подбиралась так, чтобы было удобно фиксировать распределение напряжений – не менее 10 элементов по толщине стенки. Кривые упрочнения стали 12X18H10T были взяты из имеющейся библиотеки материалов пакета DEFORM. Угол наклона образующей конической рабочей части волоки  $\alpha$  варьировался от  $5^\circ$  до  $20^\circ$ . Контактное трение описывалось законом Кулона, а коэффициент трения  $\mu$  принимался постоянным на всей контактной поверхности в течение всего процесса волочения и варьировался в пределах от 0,08 до 0,12. Скорость волочения  $V$  также варьировалась в пределах от 0,2 до 1,0 м/с. Кроме того рассматривалось влияние обжата (конечная толщина стенки трубы  $S$  варьировалась от 2 до 3 мм).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже проиллюстрирован характер распределения остаточных напряжений в стенке труб после безоправочного волочения в зависимости от технологических параметров процесса.

На рис. 3. приведены распределения радиальных (*а*), осевых (*б*) и тангенциальных (*в*) остаточных напряжений после безоправочного волочения трубы  $16 \times 4$  мм с обжатием по диаметру  $\varepsilon = 0,2$  и после 10-минутной тепловой разгрузки на спокойном воздухе ( $20^\circ\text{C}$ ). Волочение осуществлялось со скоростью 1 м/с при коэффициенте трения  $\mu = 0,08$ . При расчете угол наклона образующей конической рабочей части волоки варьировался:  $\alpha = 5; 10; 15; 20^\circ$ . На графиках  $S$  – радиальная координата по толщине стенки трубы. При этом  $S = 0$  соответствует внутренней поверхности трубы.

На рис. 4. показаны распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах размером  $16 \times 4$  мм из стали 12X18H10T после безоправочного волочения с обжатием по диаметру 20 %. Коэффициент трения в задаче изменялся от 0,08 до 0,12 и практически не повлиял на величину и распределение остаточных напряжений.

Влияние конечной толщины стенки трубы на величину и распределение остаточных напряжений в стенке трубы диаметром 16 мм при обжатии по диаметру 20 % показано на рис. 5.

Изменение скорости волочения в диапазоне от 0,2 до 1,0 м/с практически не повлияло на величину и распределение остаточных напряжений в стенке трубы размером  $16 \times 4$  мм из стали 12X18H10T после безоправочного волочения с обжатием  $\varepsilon = 0,2$  (рис. 6).

Поскольку наибольшее количество опытных данных по остаточным напряжениям касается холодного волочения прутков и проволоки, то в

качестве тестовой задачи также удобно рассмотреть случай волочения прутка. Для этого было смоделировано волочение прутка со скоростью 1 м/с через волоку с углом конусности рабочей части  $\alpha = 6^\circ$  при коэффициенте трения  $\mu = 0,08$ . Материал прутка – сталь 12Х18Н10Т. Сопротивление деформации задано таблично. При расчете варьировалось обжатие  $\varepsilon = 2\ln d_0/d_k$ , где  $d_0$  и  $d_k$  – диаметры прутка до и после волочения соответственно. Начальный диаметр во всех случаях остается неизменным  $d_0 = 10$  мм. Результаты расчета в виде графиков распределения остаточных напряжений по радиусу сечения прутка после 15-минутной тепловой разгрузки представлены на рис. 7.

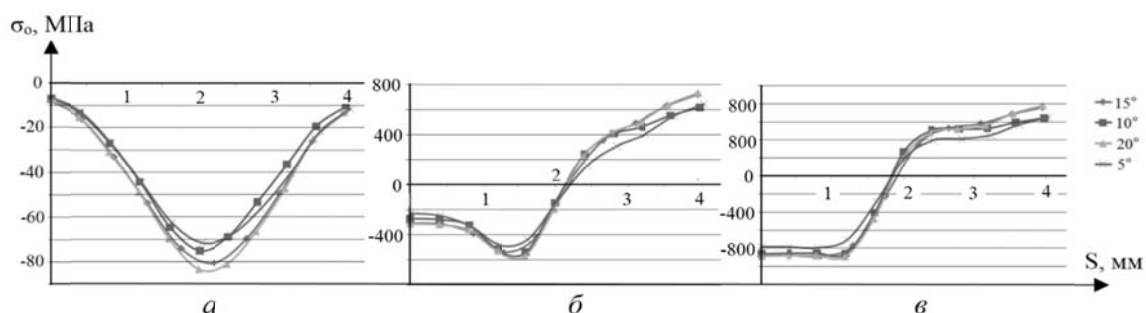


Рис. 3. Характер распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах размером  $16 \times 4$  мм после безправочного волочения в зависимости от угла конусности рабочей зоны волоки  $\alpha$ : *а* – радиальных; *б* – тангенциальных; *в* – продольных

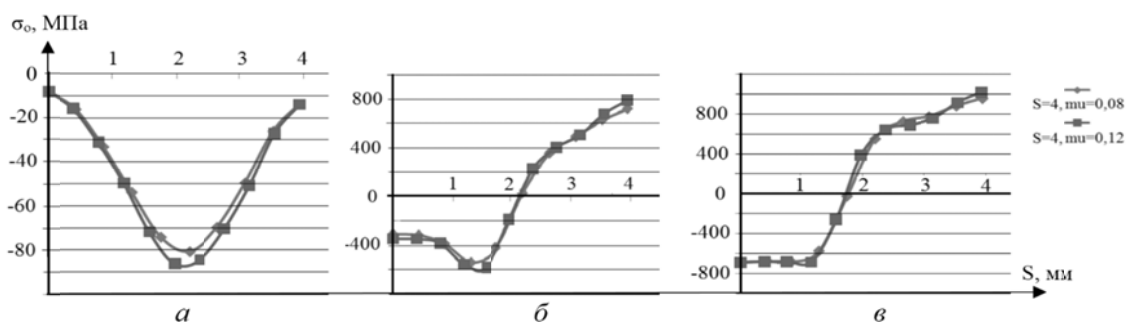


Рис. 4. Характер распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах размером  $16 \times 4$  мм после безправочного волочения в зависимости от коэффициента трения  $\mu$ : *а* – радиальных; *б* – тангенциальных; *в* – продольных

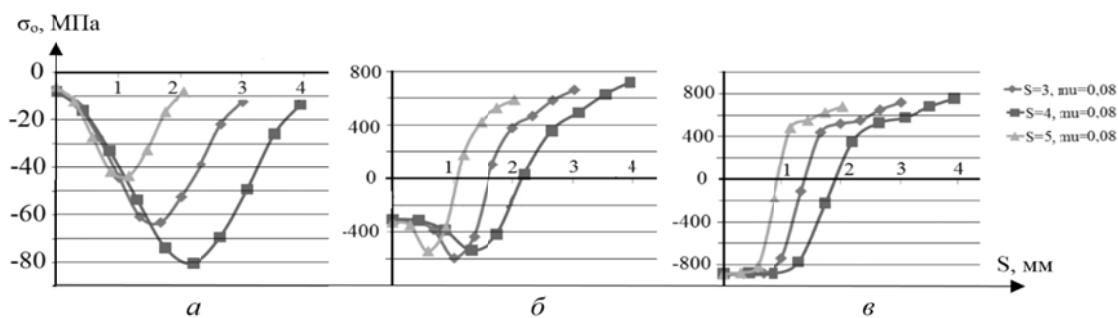


Рис. 5. Характер распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах размером  $16 \times 4$  мм после безправочного волочения в зависимости от конечной толщины стенки трубы  $S$ : *а* – радиальных; *б* – тангенциальных; *в* – продольных

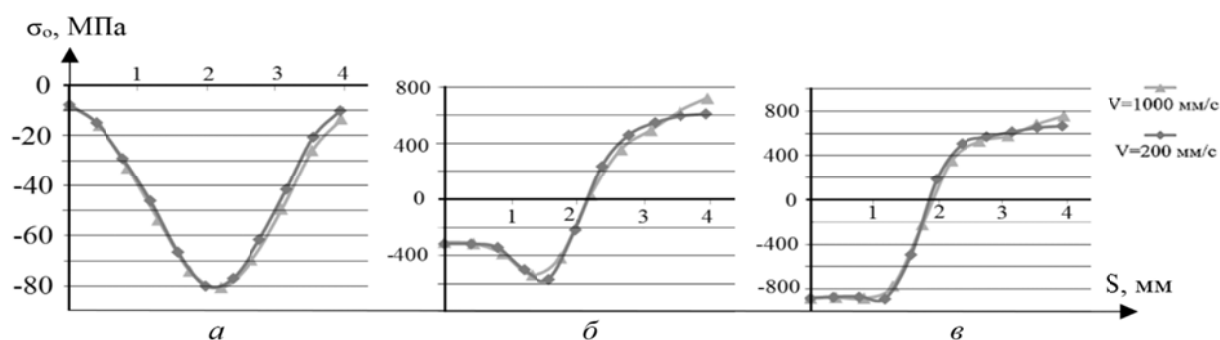


Рис. 6. Характер распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах размером  $16 \times 4$  мм после безоправочного волочения в зависимости от скорости волочения  $V$ :  $a$  – радиальных;  $b$  – тангенциальных;  $v$  – продольных

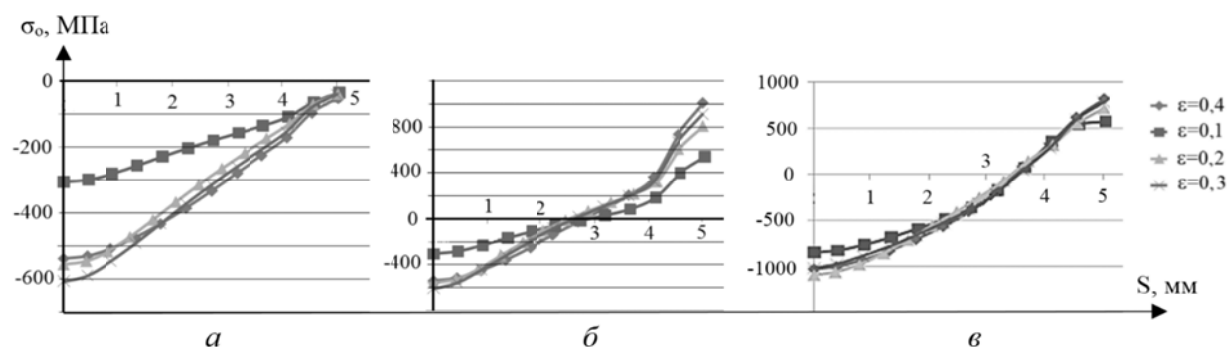


Рис. 7. Характер распределения остаточных напряжений в прутках диаметром 10 мм в зависимости от величины обжатия  $\varepsilon$ :  $a$  – радиальных;  $b$  – тангенциальных;  $v$  – продольных

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что при безоправочном волочении труб скорость волочения и коэффициент трения практически не влияют на величину и характер распределения остаточных напряжений. Абсолютное обжатие очевидно влияет на величину остаточных напряжений, но при этом закономерность распределения их по стенке трубы не меняется. Угол конусности рабочей зоны волоки влияет на величину остаточных напряжений. Чем больше угол, тем больше остаточные напряжения. Следует отметить, что зависимость от угла конусности рабочей зоны волоки не однозначна, поскольку с одной стороны большая конусность приводит к большой вне очаговой деформации, а с другой стороны упругая разгрузка в этом случае также будет больше. Тестовая задача волочения прутка показала зависимость величины остаточных напряжений от величины обжатия. Чем меньше обжатие, тем ниже остаточные напряжения. Это объясняется тем, что при малых обжатиях прутка деформация локализуется в поверхностных слоях и не проникает вглубь заготовки. Большая доля деформации оказывается упругой, что при последующей разгрузке приводит к уменьшению величины остаточных напряжений. При увеличении обжатия остаточные напряжения увеличиваются. Сопоставляя полученные расчетные данные с

опытными, известными из литературы, можно отметить качественно подобные картины распределения по сечению холодноотянутых прутков.

### ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты МКЭ-моделирования процесса безоправочного волочения труб. Показано влияние технологических параметров процесса на распределение остаточных напряжений в стенке трубы. Можно отметить удовлетворительное качество расчетов остаточных напряжений при упругопластическом решении задач волочения в конечно-элементной постановке. Результаты качественно совпадают с результатами, описанными в литературе по исследованию остаточных напряжений в трубах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10072).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гайдученко Б. И. Остаточные напряжения и усталость проволоки / Б. И. Гайдученко // Материалы научно-производственного семинара, 1965 г., Одесса. Москва : Черметинформация, 1967. С. 3–31.
2. Соколов И. А. Остаточные напряжения после пластической деформации металлов / И. А. Соколов, В. Л. Колмогоров // Труды УралНИИЧМ. Проблемы деформации металлов. Москва : Металлургия, 1968. Т. 6. С. 34–43.
3. Соколов И. А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И. А. Соколов, В. И. Уральский. Москва : Металлургия, 1981. 96 с.
4. Савин Г. А. Волочение труб / Г. А. Савин. Москва : Металлургия, 1982. 160 с.
5. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. Москва : Машгиз, 1963. 232 с.